

ЗЕРНОГРАНИЧНОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ И РОТАЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ВНУТРИЗЕРЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМИНИЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Д.В. БОРИСЮК, В.Е. ПАНИН

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет
E-mail: dasha.94.5165@mail.ru

Введение. Ползучесть металлов является одним из наиболее важных процессов, развивающихся в нагруженных материалах при постоянной нагрузке, даже если она не превышает предела текучести материала. Известно, что зернограничное скольжение (ЗГС) поликристаллических материалов играет важную роль в условиях их ползучести. Единого мнения о его механизме в литературе нет. Во многих работах, посвященных исследованию ползучести поликристаллов, утверждается, что ЗГС является следствием неоднородности внутризеренного дислокационного скольжения [1-4]. Существует другое мнение, что первичные процессы пластического течения в поликристаллах в условиях их низкотемпературной ползучести связаны с ЗГС, которое аккомодируется ротационными модами внутризеренной деформации [5-8]. При этом границы зерен выступают над поверхностью образца, что дает возможность исследовать их структуру. Это мнение более достоверно, поскольку ползучесть поликристалла развивается при напряжениях ниже предела текучести материала.

В этой связи целью настоящей работы является исследование влияния температуры и приложенного напряжения на взаимосвязь ЗГС и ротационных механизмов внутризеренной деформации при ползучести поликристаллов алюминия высокой чистоты.

Материалы и методы исследования. В качестве материала исследования использовали поликристаллический алюминий высокой чистоты (99,999 ат.%), имеющий ГЦК решетку. Плоские образцы в виде двойной лопатки с размером рабочей части $1,2 \times 8 \times 37$ мм изготавливали из листового проката алюминия с последующим отжигом в течение 0,5 ч при 240 °С. Полированную поверхность образцов для структурных исследований получали методом электролитической полировки. Размер зерен поликристаллов Al составлял $d = 400$ мкм.

Испытания на ползучесть проводили в специально созданной термостатированной установке при $T = 50$ °С и 60 °С в условиях одноосного растяжения. Величину приложенного напряжения изменяли в пределах [11-18] МПа. Удлинение образцов измеряли индикаторами часового типа с точностью ≈ 1 мкм. Структуру на разных стадиях ползучести изучали методами оптической (Axiovert 25CA), интерференционной (New View 6200), просвечивающей (JEOL 2100) и сканирующей электронной микроскопии (Quanta 200 3D).

Результаты исследования. Кривые ползучести, полученные при различных температуре и напряжениях, имеют стандартный трехстадийный вид. Степень удлинения образцов на первой стадии ползучести кратно возрастает при увеличении приложенного напряжения в интервале [11-18] МПа. При этом протяженность второй и третьей стадий ползучести сокращается. Под действием низкого приложенного напряжения ($\sigma = 11$ МПа) трансляционно-ротационные моды деформации в основном связаны с границами зерен и приграничными зонами локализованного пластического течения. Особенностью является, что следы пластической деформации на основной поверхности зерен, в которых развивается ЗГС, выражены слабо, а приграничная ротационная деформация в зерне оказывается очень однородной и сильно локализована. Максимальная высота ступенек ЗГС достигает ≈ 18 мкм.

При увеличении напряжения до $\sigma = 13$ МПа максимальная высота ступенек ЗГС уменьшается до 7 мкм и на поверхности зерен в зоне ЗГС развиваются линии аккомодационного скольжения. Важно подчеркнуть, что экструзия вершин зерен при ЗГС

сопровождается их поворотом. Переход к третьей стадии ползучести при $\sigma = 13$ МПа сопровождается усилением фрагментации и смятия приграничных зон, расслоением и разрывом материала в приграничных зонах. Резко увеличивается степень экструзии – интрузии материала.

Характер пластической деформации поверхностного слоя при ЗГС в условиях ползучести под напряжением $\sigma = 18$ МПа резко изменяется. Экструзия материала при ЗГС осуществляется в условиях резкого возрастания тангенциальной составляющей смещений материала вдоль поверхности и уменьшения смещений, нормальных к поверхности образца. Экструзия материала при ЗГС осуществляется смещением крупных слоев, при этом высота вертикальных ступенек не превышает 3 мкм.

Повышение температуры ползучести до 60 °С при напряжении $\sigma = 18$ МПа существенно уменьшило скорость пластического течения и в 2,3 раза увеличило время до разрушения образца. Существенно изменился характер как ЗГС, так и аккомодационной внутризеренной деформации.

Компонента ЗГС_n, нормальная к поверхности образца, практически отсутствует. В то же время тангенциальная компонента ЗГС_t хорошо выражена на поверхности образца. Характерно, что процесс тангенциального сдвига вызывает развитие аккомодационной деформации в приграничных зонах обоих смежных зерен. Кривизна решетки в приграничных зонах становится столь большой, что генерация дислокаций на границах зерен становится невозможной. Возникновение в междоузлиях кривизны решетки новых структурных состояний создает возможность генерации и некристаллографического распространения в зернах полос сдвига. Развивается многоуровневая фрагментация, очень часто в виде пластических ротаций, которые наследуют сложный профиль кривизны решетки. Разрушение на третьей стадии ползучести происходит в сильно неравновесном материале, в котором развивается деградация исходной кристаллической структуры.

Традиционный анализ закономерностей ползучести на основе теории дислокаций вполне корректен при невысоких приложенных напряжениях, когда длительность стадии установившейся ползучести велика. Механизмы деформации и разрушения на второй и третьей стадиях ползучести при больших приложенных напряжениях $\sigma = 18$ МПа, а также в условиях диффузионной ползучести в должны описываться с учетом кривизны кристаллической решетки.

Список литературы

1. Hirth J.P. and Lothe J. Theory of Dislocations, 2nd ed. New York: J. Willey, 1981.
2. Meyers M.A., Chavla K.K., Mechanical Behaviour of Materials. – Upper Saddle River. N-Y: Prentlee Hall, 1999. – 630p.
3. Courtney T.R. Mechanical Behaviour of Materials. Michigan: Mc Gra–Hill, 2000. – 733p.
4. Matsunaga T., Kameyama T., Sato E. Grain boundary sliding induced by lattice dislocation activity during ambient temperature creep in h.c.p. metals // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2009. V. 3. Article 012014.
5. Matsunaga T., Kameyama T., Ueda S., Sato E. Grain boundary sliding during ambient-temperature creep in hexagonal close-packed metals // Phil. Mag. 2010. V. 90. N 30. P. 4041–4054.
6. Wang Z., Zhao Y., Kohlstedt D.L. Dislocation creep accommodated by grain boundary sliding in dunite // J. Earth Sci. 2010. Iss. 5. P. 541–554.
7. Gifkins R.C. Grain-boundary sliding and its accommodation during creep and superplasticity // Met. Trans. 1976. V. 7A. Iss. 8. P. 1225–1232.
8. Lohmiller J., Grewer M., Braun C. et al. Untangling dislocation and grain boundary mediated plasticity in nanocrystalline nickel // Acta Materialia. 2014. V. 65. P. 295–308.